

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СТАРОВОЙТ ЯРОСЛАВ ІВАНОВИЧ



УДК 681.8

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ КРУГОВИХ
АНТЕННИХ РЕШІТОК, УТВОРЕНИХ ІЗ ЦИЛІНДРИЧНИХ
П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ І ЕКРАНУ

Спеціальність 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор

Лейко Олександр Григорович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (м. Київ), професор кафедри акустики та акустoeлектроніки.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор

Мислович Михайло Володимирович

Інститут електродинаміки Національної академії наук України (м. Київ), завідувач відділом теоретичної електротехніки

– кандидат технічних наук, доцент

Мелешко Микола Андрійович,

Національний авіаційний університет, професор кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій

Захист відбудеться «02» квітня 2020 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37, корпус 12, аудиторія 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «27» лютого 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Кругові циліндричні гідроакустичні антени знайшли широке застосування при побудові корабельних та авіаційних гідроакустичних станцій. Зазвичай, їх утворюють із гідроакустичних перетворювачів, які розміщені по циліндричній поверхні, та циліндричного акустичного екрану у внутрішній порожнині цієї поверхні. Найбільш широке застосування в таких антенах знайшли циліндричні п'єзокерамічні перетворювачі і акустично м'які екрани. На відміну від радіотехнічних антен гідроакустичні антени виконують дві функції – функцію перетворення одного виду енергії в інший і функцію формування акустичного поля в оточуючому середовищі. Кожна з цих функцій має свої фізичні особливості.

Функція перетворення енергії в п'єзокерамічних перетворювачах базується на зв'язаності між собою трьох типів полів, що приймають участь в цьому процесі – електричного, механічного і акустичного.

Для функції формування акустичного поля характерним є обмін звуковими хвилями, випроміненими і відбитими всіма елементами, що утворюють антену. Оскільки при цьому під дією цієї акустичної взаємодії змінюються і акустичні поля випромінювачів у складі антени, то обидві названі функції гідроакустичних антен стають теж залежними між собою.

Складність математичного опису цих функцій змусила при розробці аналітичної бази для проектування антен розділити ці функції і розглядати їх незалежно одна від одної. Зв'язок між ними забезпечувався заданням нормальної складової коливальної швидкості на поверхнях перетворювачів в режимі випромінення звуку антеною. Для функції перетворення енергії гідроакустичними антенами значний внесок в розвиток теорії зробили такі вчені як Грінченко В.Т., Гузь О.М., Кубенко В.Д., Аронов Б.С., Петріщев О.М., Старов Л.С., Улітко А.Ф., та інші.

Підходи до аналітичного опису функції формування акустичної енергії гідроакустичними антенами розвивали в своїх роботах Грінченко В.Т., Вовк І.В., Карновський М.І., Лейко О.Г., Маципура В.Т., Шендеров Є.Л. та інші.

Але при наведеному вище підході задання коливальної швидкості перетворювачів ідеалізує джерела звуку, оскільки в цьому випадку їх коливальна швидкість не залежить від реакції оточуючого середовища. В реальних антенах коливальна швидкість перетворювачів має кінцеві значення у кожного із них і залежить як від внутрішнього механічного опору, так і від реакції оточуючих середовищ. Завдяки цьому параметри реальних антен відрізняються від параметрів антен, що були розраховані із використанням розділених підходів.

Виходом із наведеної ситуації є розробка таких аналітичних підходів проектування гідроакустичних антен, які дозволяли б враховувати взаємну залежність фізичних полів при перетворенні енергії, акустичну взаємодію між собою елементів гідроакустичних антен при формуванні акустичних полів і вплив процесів формування акустичних полів на процеси перетворення енергії в перетворювачах антен. Розробці таких підходів присвячені роботи Грінченка В.Т., Гузя О.М., Вовка І.В., Дерепи А.В., Коржика А.В., Кубенка В.Д., Лейка

О.Г., Маципури В.Т., Петріщева О.М., Улітка А.Ф., Aronov B., Ebenezer D. та інші. В той же час розробка аналітичного забезпечення проектування кругових циліндричних антен з екраном з урахуванням всіх наведених вище взаємодій різних фізичних полів випала із поля зору дослідників. А оскільки названі гідроакустичні антени є основою сучасних гідроакустичних станцій різного призначення, то створення названого аналітичного забезпечення являє собою актуальну задачу для практичної гідроакустики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі акустики та акустоелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках держбюджетної НДР «Розробка неінвазивної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини» (номер державної реєстрації – №0118U003533).

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є створення аналітичного забезпечення для виконання проектних робіт по круговим циліндричним гідроакустичним антенним решіткам, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів та циліндричного акустично м'якого екрану, з урахуванням взаємодії фізичних полів при перетворенні енергії і формуванні її в оточуючому середовищі та взаємодії процесів перетворення і формування енергії між собою.

Досягнення сформульованої мети можливо здійснити шляхом розв'язання наступних завдань:

1. Розробка розрахункових моделей кругових циліндричних антенних решіток з екранами і циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами, які дозволяють врахувати при випроміненні звуку взаємодію всіх задіяних фізичних полів і особливості виконання конструкцій антен.

2. Розвиток на основі методу зв'язаних полів в багатозв'язних областях нових підходів до розв'язку «наскрізних» задач випромінення звуку круговими антенними решітками з екраном і циліндричними п'єзокерамічними випромінювачами і одержання на їх основі розрахункових співвідношень для проектування антен, в яких враховані зв'язаності всіх задіяних фізичних полів і процесів.

3. Систематизація чисельних досліджень на основі одержаних співвідношень властивостей електричних, механічних та акустичних полів кругових антенних решіток з екраном і встановлення закономірностей їх змін в залежності від конструктивного виконання антен.

4. Експериментальні дослідження кругових антенних решіток з екраном для підтвердження адекватності запропонованих розрахункових моделей і реальних антен.

5. Фізичне осмислення встановлених закономірностей і розробка на його основі практичних рекомендацій по проектуванню кругових циліндричних гідроакустичних антенних решіток з екраном, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів.

Об'єкт дослідження – процеси взаємодії фізичних полів кругових антенних решіток з екраном при перетворенні енергії і її формуванні в оточуючому середовищі.

Предмет дослідження – кругові антенні решітки, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і екрану.

Методи дослідження.

Дослідження виконані із застосуванням ряду методів постановки і розв'язання задач стаціонарної гідроелектропружності. Так, наскрізні задачі випромінення звуку круговими антенними решітками, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і акустичного екрану, розв'язані методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях. Для одержання аналітичних співвідношень, що визначають задіяні в процесі випромінення звуку фізичні поля, використані методи часткових областей і переносу систем координат. Чисельні результати одержані з використанням методів розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь. При експериментальних дослідженнях застосовані методи вимірювання акустичних полів в заглушених гідроакустичних басейнах.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновані нові розрахункові моделі кругових циліндричних гідроакустичних антенних решіток з екраном, які дозволяють при визначенні фізичних полів решіток і їх елементів при випроміненні звуку врахувати взаємодію як їх фізичних полів, так і процесів перетворення енергії і формування її в оточуючому просторі.

2. Розвинуті методи «наскрізного» розв'язку задач випромінення звуку стосовно кругових циліндричних антен з екраном, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, результатом застосування яких є визначення аналітичних співвідношень для наступних розрахунків фізичних полів, що приймають участь у випроміненні звуку.

3. Для кругових циліндричних антенних решіток з екраном за допомогою систематизованих досліджень з єдиних методичних позицій вперше встановлені властивості зв'язаних між собою електричних, механічних та акустичних полів решіток та їх елементів в залежності від конструкційних, хвильових та фізичних характеристик решіток та випромінювачів.

4. З урахуванням зв'язаності фізичних полів та процесів перетворення енергії і її формування в оточуючих середовищах вперше встановлені для кругових циліндричних антенних решіток з екраном:

- суттєві зміни в механічних полях випромінювачів цих решіток, пов'язані з втратою ними одномодовості цих полів і набуття багатомодовості коливань;
- значне збагачення спектрів власних частот акустичних полів як кругових антенних решіток, так і випромінювачів у їх складі та поширення цього спектру в область низьких частот, значення яких в 5 – 7 разів нижче власних частот п'єзокерамічних оболонок випромінювачів;
- встановлення повної відповідності між закономірностями змін збуджуючих випромінювачі електричних струмів і амплітуд коливальної швидкості нульової моди механічного поля відповідних випромінювачів;

визначення умов, при яких окремі випромінювачів кругових антенних решіток з екраном в режимах секторного випромінювання акустичної енергії переходять із режиму випромінювання в режим поглинання її із оточуючого середовища.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Забезпечено відповідність параметрів спроектованих антенних решіток заданим технічним вимогам на підставі розроблених наукових основ розрахунків при виконанні проектних робіт параметрів акустичних, механічних і електричних полів кругових антенних решіток з екраном в різних режимах випромінювання.

2. Встановлені можливості ефективного випромінювання звуку круговими антенними решітками з екраном в області низьких частот на заново генерованих механічних резонансах, частоти яких в 5 – 7 раз нижчі від основної власної частоти п'єзокерамічної оболонки випромінювачів без зміни геометричних розмірів антени.

3. Визначені умови електричного збудження кругових антенних решіток з екраном, при яких в певних діапазонах частот виникає значне погіршення енергетичної ефективності антенних решіток.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджені в практику проектних робіт в ДП «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» при виконанні розрахунків звукових полів циліндричних перетворювачів по контракту №15DMAC/YZD589UA від 28.08.2015 р. з КНР, що підтверджується відповідним актом впровадження. Результати досліджень використовуються також і в навчальному процесі НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» при підготовці бакалаврів і магістрів з акустики по дисциплінам «Електроакустичні перетворювачі» та «Акустичні антени».

Особистий внесок здобувача.

Усі результати, що наведено у дисертаційній роботі і виносяться на захист, отримані особисто автором або ж за його активної участі та опубліковано у спеціалізованих фахових виданнях. Безпосередньо автором здійснено:

- інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;
- отримання розрахункових співвідношень, для проведення досліджень;
- проведення розрахунків;
- проведення експериментальних досліджень.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні положення роботи викладено та обговорено на 5 науково-технічних конференціях різного рівня:

- Акустичний симпозіум «КОНСОНАНС – 2015» (Київ, 2015 р.);
- VI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2013» (Київ, 2013 р.);
- IX Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2016» (Київ, 2016 р.);
- VI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 2015 р.);

- IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, 2016 р.).

Публікації.

За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, 6 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 статті в інших виданнях 3 патенти на корисну модель, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Перелічені публікації повністю відображають використаний у роботі матеріал.

Структура й обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг роботи становить 241 сторінок, у тому числі 170 сторінок основного тексту, 96 рисунків та списку використаних джерел із 125 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** представлено обґрунтування вибору теми дослідження, представлена актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих в роботі результатів та представлені дані щодо апробації роботи.

В **першому розділі** описані конструктивні особливості кругових гідроакустичних антен, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і акустично м'якого екрану, які необхідно враховувати при визначенні фізичних полів даного типу акустичних антен. Представлено розв'язок задачі випромінювання акустичних сигналів такими антенними решітками, який враховує як конструктивні особливості побудови такої антенної решітки, так і конструктивні особливості технічної реалізації кругових циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, з яких вона утворена. До конструктивних особливостей побудови антенної решітки відносять її розміри, кількість випромінювачів у її складі, розміри акустично м'якого екрану та режими її роботи (круговий або секторний). В свою чергу, до конструктивних особливостей випромінювача відносять: тип його конструкції – силова, при якій його внутрішнє середовище вакуумоване або заповнене повітрям, або компенсована, коли внутрішнє середовище заповнюється рідиною з певним хвильовим опором; тип його п'єзокерамічної оболонки – секціонована або суцільна, що відображається в характері її поляризації; тип активного матеріалу, із якого виконано оболонку.

В математичному плані для опису акустичного поля в роботі використовується хвильове рівняння. Процеси електромеханічного перетворення енергії в п'єзокерамічному перетворювачі описуються рівняннями стану п'єзокераміки та диференціальними рівняннями електропружних коливань циліндричних п'єзокерамічних тіл.

На рис.1 представлена розрахункова модель кругової циліндричної антенної решітки, яка утворена із кінцевого числа N однакових за розміром циліндричних

п'єзокерамічних випромінювачів і акустично м'якого екрану N+1, що розміщений в центрі решітки. При цьому поздовжні вісі всіх випромінювачів та екрану паралельні між собою. Кожен із випромінювачів являє собою нескінченну п'єзокерамічну оболонку, внутрішня порожнина якої може бути вакуумована, заповнена повітрям або рідиною. Екран являє собою нескінченний по висоті циліндр, який виконаний із акустично м'якої гуми. В залежності від кількості одночасно увімкнених випромінювачів антена працює в режимі кругового випромінювання, або секторного випромінювання.

Збудження випромінювачів забезпечено підведенням до електродів кожного із випромінювачів гармонійного електричного сигналу $\psi^{(s)} = \psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$, де $\psi_0^{(s)}$ – амплітуда електричної напруги, ω – частота електричного збудження, а s – номер випромінювача у складі решітки.

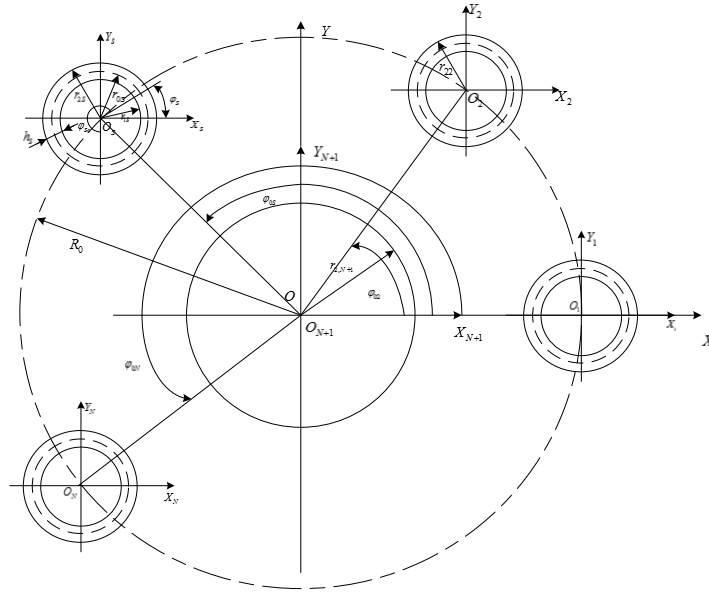


Рис. 1. Поперечний переріз розрахункової моделі кругової циліндричної антени з екраном.

Для отримання розрахункових співвідношень було проведено спільне вирішення системи диференціальних рівнянь у складі:

– диференціальних рівнянь електропружних коливань тонкої циліндричної оболонки в вакуумі в циліндричних координатах:

- для випромінювачів з окружною поляризацією:

$$\left(1 + \beta^{(s)}\right) \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial W^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial U^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 U^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - W^{(s)} + \frac{e_{33}^{(s)} r_{0s}}{C_{33}^{E(s)}} E_\varphi^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 W^{(s)}}{\partial t^2}; \quad (2)$$

- для випромінювачів з радіальною поляризацією:

$$\left(1 + \beta^{(s)}\right) \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial W^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial u^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - w^{(s)} + \frac{e_{31}^{(s)} r_{0s}}{C_{11}^{E(s)}} E_r^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 w^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (4)$$

де $u^{(s)}$, $w^{(s)}$ – тангенціальна та радіальна складові вектору зміщень точок серединної поверхні оболонки, φ – кутова координата,

$\beta^{(s)} = (h_s)^2 / 12r_{0s}^2 \left(1 + \left(e_{31}^{(s)} \right)^2 / C_{11}^{E(s)} \varepsilon_{33}^{s(s)} \right)$, $\alpha^{(s)} = r_{0s}^2 / C_{11}^{E(s)}$ – для випромінювачів з

радіальною поляризацією; $\beta^{(s)} = (h_s)^2 / 12r_{0s}^2 \left(1 + \left(e_{33}^{(s)} \right)^2 / C_{33}^{E(s)} \varepsilon_{33}^{s(s)} \right)$,

$\alpha^{(s)} = r_{0s}^2 / C_{33}^{E(s)}$ – для випромінювачів з окружною поляризацією; $E_\varphi^{(0)s}$ та $E_r^{(0)s}$ – напруженість електричного поля в матеріалі оболонки з окружною та тангенціальною поляризацією, відповідно; $C_{11}^{E(s)}$, $C_{33}^{E(s)}$, $e_{31}^{(s)}$, $e_{33}^{(s)}$ – модулі пружності при нульовій електричній напруженості та п'єзоконстанти матеріалу; $\varepsilon_{33}^{s(s)}$ – діелектрична проникність при нульовій деформації; $q_r^{(s)}$ – зовнішнє акустичне навантаження; r_{0s} – серединний радіус s -го випромінювача;

– хвильового рівняння Гельмгольца для гармонічних коливань, що описує поширення акустичних хвиль в зовнішньому та внутрішньому середовищах випромінювача:

$$\Delta^2 \Phi^{(s)} + (k_{js})^2 \Phi^{(s)} = 0; \quad (5)$$

де $\Phi^{(s)}$ – потенціал коливальної швидкості s -го випромінювача, Δ – оператор Лапласа в циліндричній системі координат, $k_s = 2\pi/\lambda$ – хвильове число s -го випромінювача ($j=1,2$ – відповідно зовнішнє та внутрішнє середовище).

– рівняння вимушеної електростатики для s -го випромінювача

$$\vec{E}^{(s)} = -\text{grad}\psi^{(s)}; \text{div}\vec{D}^{(s)} = 0, \quad (6)$$

де $\vec{E}_r^{(s)}$, $\vec{D}_r^{(s)}$ – вектори напруженості та індукції електричного поля.

Область існування звукового поля є багатозв'язною, оскільки звукові поля випромінювачів існують в двох областях – зовнішній – $\Phi_1^{(s)}$ і внутрішній – $\Phi_2^{(s)}$, а акустичного екрана $\Phi_1^{(N+1)}$ – тільки в зовнішній. Границі середовищ визначаються співвідношеннями: для внутрішніх областей $0 \leq |\varphi_s| \leq \pi$, $0 \leq r_s \leq r_{1s} = r_{0s} - h_s/2$, $S=1, \dots, N$; для зовнішніх областей $0 \leq |\varphi_s| \leq \pi$, $r_s \geq r_{2s} = r_{0s} + h_s/2$, $S=1, \dots, N$; $r_{N+1} > r_{2,N+1}$. З урахуванням приведених границь кінематичні і динамічні умови сполучення звукових полів на цих границях приймають вигляд:

– на поверхнях кожного випромінювача забезпечено умови рівності швидкостей коливань часток середовищ і швидкостей нормальних зміщень поверхонь випромінювачів:

$$-\frac{\partial \Phi_1(r_s, \varphi_s)}{\partial r_s} = \frac{\partial w^{(s)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, \quad r_s = r_{2s}, \quad S = 1, \dots, N; \quad (7)$$

$$-\frac{\partial \Phi_2^{(s)}(r_s, \varphi_s)}{\partial r_s} = \frac{\partial w^{(s)}}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, \quad r_s = r_{1s}, \quad S = 1, \dots, N; \quad (8)$$

де $\Phi(r_s, \varphi_s)$ – поле випромінювання антени, записане в координатах s - го випромінювача;

– на поверхні кожного випромінювача забезпечено умова рівності нормальної складової тензора напруг $\sigma_r^{(s)}$ звуковому тиску, взятому із протилежним знаком:

$$\sigma_r^{(s)} = q_r^{(s)} = -(p - p_2^{(s)}), \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, \quad r_s = r_{2s}, \quad S = 1, \dots, N; \quad (9)$$

де $p_1 = \rho \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}$ і $p_2^{(s)} = \rho_s \frac{\partial \Phi_2^{(s)}}{\partial t}$ – радіаційні навантаження від динамічних тисків;

– на поверхні акустично м'якого екрану виконується рівність нулю звукового тиску:

$$\Phi_1^{N+1} = 0, \quad 0 \leq |\varphi_{N+1}| \leq \pi, \quad r_{N+1} = r_{2,N+1}; \quad (10)$$

Електричні граничні умови з урахуванням динамічного деформування s - го циліндричного випромінювача напругою $\psi^{(s)} = \psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$ і рівнянь вимушеної електростатики приймають вигляд:

– напруженість електричного поля в матеріалі п'єзокерамічної оболонки s - го випромінювача при окружній поляризації дорівнює:

$$E_\varphi^{(s)} = -\frac{\psi_0^{(s)} M_{(s)}}{2\pi r_{0s}}, \quad S = 1, \dots, N, \quad (11)$$

де $M_{(s)}$ – кількість призм в секціонованій п'єзокерамічній оболонці s – го випромінювача;

– напруженість електричного поля в матеріалі п'єзокерамічної оболонки s - го випромінювача при радіальній поляризації дорівнює:

$$E_\rho^{(s)} = -\psi_0^{(s)} / h_s, \quad S = 1, \dots, N, \quad (12)$$

де h_s – товщина п'єзокерамічної оболонки s - го циліндричного випромінювача;

– компоненти електричної індукції вздовж радіуса $D_r^{(s)}$, поздовжньої вісі $D_z^{(s)}$ і окружності $D_\varphi^{(s)}$ дорівнюють відповідно:

• для окружної поляризації:

$$D_r^{(S)} = 0; \quad D_z^{(S)} = 0; \quad D_\varphi^{(S)} = \varepsilon_{33}^{(S)} E_\varphi^{(S)} + e_{33}^{(S)} \left(\frac{1}{r_s} \frac{\partial u^{(S)}}{\partial \varphi_s} + \frac{w^{(S)}}{r_s} \right); \quad (13)$$

• для радіальної поляризації:

$$D_r^{(s)} = \varepsilon_{33}^{(s)} E_r^{(s)} + e_{31}^{(s)} \left(du^{(s)} / d\varphi_s + w^{(s)} \right) / r_{0s} + e_{33}^{(s)} \left(dw^{(s)} / dr_{0s} \right); \quad D_\varphi^{(s)} = D_z^{(s)} = 0 \quad (14)$$

Перераховані умови доповнено умовами випромінювання на нескінченності та відсутністю особливостей у внутрішніх середовищах кожного із випромінювачів антени.

Для розв'язання сформульованої задачі визначеними вище методами представлено зміщення оболонок випромінювачів, які описують механічні поля випромінювачів, у вигляді розкладень $u^{(S)}$ та $w^{(S)}$ за власними формами коливань оболонок в вакуумі:

$$u^{(S)} = \sum_n u_n^{(S)} e^{in\varphi_S}; \quad w^{(S)} = \sum_n w_n^{(S)} e^{in\varphi_S}; \quad S = 1, \dots, N; \quad (15)$$

Акустичне поле антени в оточуючому її середовищі представимо у вигляді суперпозиції полів $\Phi_1^{(S)}$, створених кожним із елементів антени

$$\Phi = \sum_{S=1}^{N+1} \Phi_1^{(S)}. \quad (16)$$

Акустичні поля, які створено кожним із випромінювачів і екраном у зовнішньому і внутрішньому середовищах, представлено розкладеннями за хвильовими циліндричними функціями, відповідно:

$$\Phi_1^{(S)}(r_S, \varphi_S) = \sum_n A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_S) e^{in\varphi_S}, \quad S = 1, \dots, N+1; \quad (17)$$

$$\Phi_2^{(S)}(r_S, \varphi_S) = \sum_n B_n^{(S)} J_n(k_2^{(S)} r_S) e^{in\varphi_S}, \quad S = 1, \dots, N, \quad (18)$$

де використані традиційні позначення циліндричних функцій.

Алгебраїзація виразів (4), (5) та (7) – (9) з використанням (17), (18) та теореми додавання циліндричних функцій дозволяє на основі властивостей повноти та ортогональності систем кутових функцій на інтервалі $[0; 2\pi]$ отримати нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} -B_n^{(S)} J_n'(k_2^{(S)} r_{1S}) + i c_2^{(S)} w_n^{(S)} &= 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty; \\ icw_n^{(S)} - \left[A_n^{(S)} H_n^{(1)'}(kr_{2S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] &= 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty; \\ A_n^{(N+1)} H_n^{(1)}(kr_{2,N+1}) + \sum_{q=1}^N \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{2,N+1}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{q,N+1}) e^{i(m-n)\varphi_{q,N+1}} &= 0, \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad (19) \\ R_n^{(S)} w_n^{(S)} + \frac{\alpha_S}{h_S} i \omega \rho \left[A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_{1S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] - \\ - \frac{\alpha_S}{h_S} i \omega \rho_s B_n^{(S)}(k_2 r_{1S}) J_n(k_2^{(S)} r_{1S}) &= - \frac{e_{33}^{(S)}}{C_{33}^{E(S)}} \frac{N^{(S)} \psi_0^{(S)}}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{in\varphi} d\varphi, \quad S = 1, \dots, N; \quad n = -\infty, 0, \infty. \end{aligned}$$

Для радіальної поляризації у вигляді:

$$\begin{aligned} -B_n^{(S)} J_n'(k_2^{(S)} r_{1S}) + i c_2^{(S)} w_n^{(S)} &= 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty; \\ icw_n^{(S)} - \left[A_n^{(S)} H_n^{(1)'}(kr_{2S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] &= 0, \quad S = 1, \dots, N, \quad n = -\infty, 0, \infty; \end{aligned}$$

$$A_n^{(N+1)} H_n^{(1)}(kr_{2,N+1}) + \sum_{q=1}^N \sum_m A_m^{(N+1)} J_n'(kr_{2,N+1}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{q,N+1}) e^{i(m-n)\varphi_{q,N+1}} = 0, \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad (20)$$

$$R_n^{(S)} w_n^{(S)} + \frac{\alpha_S}{h_S} i\omega\rho \left[A_n^{(S)} H_n^{(1)}(kr_{1S}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq S}}^{N+1} \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{2S}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qS}) e^{i(m-n)\varphi_{qS}} \right] - \\ - \frac{\alpha_S}{h_S} i\omega\rho_S B_n^{(S)}(k_2 r_{1S}) J_n(k_2 r_{1S}) = - \frac{e_{31}^{(S)}}{C_{11}^{E(S)}} \frac{r_{0S} \psi_0^{(S)}}{h} \int_0^{2\pi} e^{in\varphi} d\varphi, \quad S = 1, \dots, N; \quad n = -\infty, 0, \infty,$$

де $R_n^{(S)} = n^2(1 + \beta_S n^2)^2 - (1 + \beta_S n^4 - \alpha_S \gamma_S \omega^2) [n^2 + \beta_S n^2 - \alpha_S \gamma_S \omega^2] / (1 + \beta_S) n^2 - \alpha_S \gamma_S \omega^2$.

Заміна $A_n^{(s)}$ та $B_n^{(s)}$ новими невідомими $\tilde{A}_n^{(s)}$ та $\tilde{B}_n^{(s)}$ за формулами $\tilde{A}_n^{(s)} = A_n^{(s)} H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ та $\tilde{B}_n^{(s)} = B_n^{(s)} J_n'(k_s r_{2s})$, дозволяє перетворити нескінченні системи (22) та (23) до вигляду квазірегулярних і застосувати для їх вирішення метод редукції або послідовних наближень.

Отримані в результаті рішення нескінченних систем (22) та (23) коефіцієнти $u_n^{(S)}$, $w_n^{(S)}$, $A_n^{(S)}$, $B_n^{(S)}$ визначають фізичні поля кругових циліндричних антен з екранами для випадків окружної та радіальної поляризації активного елементу відповідно, при формуванні яких враховуються як взаємодія електричних, механічних та акустичних полів при перетворенні енергії, так і взаємодія випромінювачів та екрану при формуванні акустичного поля, зумовлена багатократним обміном хвилями між елементами решітки.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню механічних полів випромінювачів у складі досліджуваної антенної решітки. Як характеристика механічного поля вибрано коливальну швидкість на поверхні кожного із випромінювачів, а саме, частотні та фазові залежності коливальної швидкості в певних точках поверхонь випромінювачів і кутовий розподіл коливальної по поверхні випромінювачів на певних частотах. Також для проведення більш детального аналізу обрано частотний та кутовий розподіл коливальної швидкості по модам коливань.

При цьому розрахунки проведено згідно з виразами (19) для випромінювачів з окружною поляризацією та згідно із (20) – для випромінювачів з радіальною поляризацією. Для встановлення закономірностей поведінки властивостей механічних полів від особливостей конструктивного виконання циліндричної акустичної антени з екраном досліджувались частотні та кутові залежності амплітуд та фаз наведених параметрів цих полів та мод, з яких вони складаються, від: типу виконання конструкцій випромінювачів – силової чи компенсованої та фізичних характеристик середовищ, що заповнюють внутрішню порожнину випромінювачів; розмірів акустичного екрана; кількості випромінювачів в антені та геометрії їх розміщення (сектором або по всій окружності антени); складу застосованої в конструкції п'єзокераміки та характеру її поляризації; розмірів – діаметру та товщини п'єзокерамічної оболонки випромінювачів.

Розрахунки числових характеристик механічних полів проведено для наступних числових значень та конструктивних особливостей циліндричних

акустичних антен з екраном та випромінювачів у їх складі. Склад матеріалу п'єзокерамічних оболонок: ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3. Середні радіуси п'єзокерамічних оболонок та їх товщини змінювалися відповідно в діапазонах $r_{0s} = 0,068 \div 0,12$ м та $h_s = 0,008 \div 0,012$ м; кількість випромінювачів у складі антенної решітки змінювалась в діапазоні $N = 3 \div 5$.

Кількість призм в оболонках з окружною поляризацією була прийнята рівною $M = 48$. Електрична напруга, якою збуджено кожен з випромінювачів антенної решітки, становила $\psi_0 = 200$ В. Внутрішні порожнини п'єзокерамічних оболонок випромінювачів вакуумувались ($\rho_1 c_1 = 0$), заповнюватись повітрям ($\rho_1 c_1 = 419,1$ кг/м²с) або рідинами з різними густиною та швидкістю звуку ($\rho_1 c_1 = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²с; $1,2 \cdot 10^6$ кг/м²с; $0,75 \cdot 10^6$ кг/м²с). Розміри акустичного екрану становили $r_{2,N+1} = r_{0s}; 3 \cdot r_{0s}; 5 \cdot r_{0s}$. Аналіз проведено в частотному діапазоні $f = 0 \div 20000$ Гц. Усі наведені частотні залежності коливальних швидкостей розраховано в точках на поверхні випромінювачів ($r_2, \varphi = \varphi_0$).

Нескінченні системи алгебраїчних рівнянь (19) та (20) розв'язано при рівні редукції, що становив 50. При цьому похибка виконання граничних умов не перевищувала 5%.

Результати розрахунків механічних полів наведено на рис. 2.

На рис. 2, а наведено розподіл коливальної швидкості на поверхні одиночного випромінювача; випромінювача, який розміщено поблизу з екраном; вакуумованого випромінювача у складі антенної решітки з рівномірним розміщення випромінювачів; випромінювача, заповненого повітрям у складі антенної решітки з рівномірним розміщенням випромінювачів. Аналіз приведених кривих показує, що розміщення навіть одиночного випромінювача поряд із акустичним екраном призводить до суттєвої зміни виду частотної залежності коливальної швидкості на поверхні випромінювача, що відображено у виникненні додаткових вузькосмугових резонансів у всій досліджуваній частотній області. Амплітуди коливань на частотах цих викидів значно перевищують амплітуду коливань на поверхні одиночного випромінювача. У той самий час амплітуда коливань поверхні випромінювача поза резонансними викидами є навіть нижчою за амплітуду коливань одиночного випромінювача на тій самій частоті. Ще одним важливим фактом є те, що вузькосмугові викиди проявляються, починаючи з частот, значно нижчих за частоту резонансу оболонки у вакуумі.

Зміна режиму роботи антени з режиму рівномірного випромінювання на режим секторного випромінювання (рис. 2, б та 2, в) призводить до суттєвого видозмінення частотної характеристики коливальної швидкості випромінювачів. При цьому частотні характеристики крайніх випромінювачів (рис. 2, в) суттєво відрізняються від частотних характеристик випромінювачів, що знаходяться в середині сектору випромінювання (рис. 2, б).

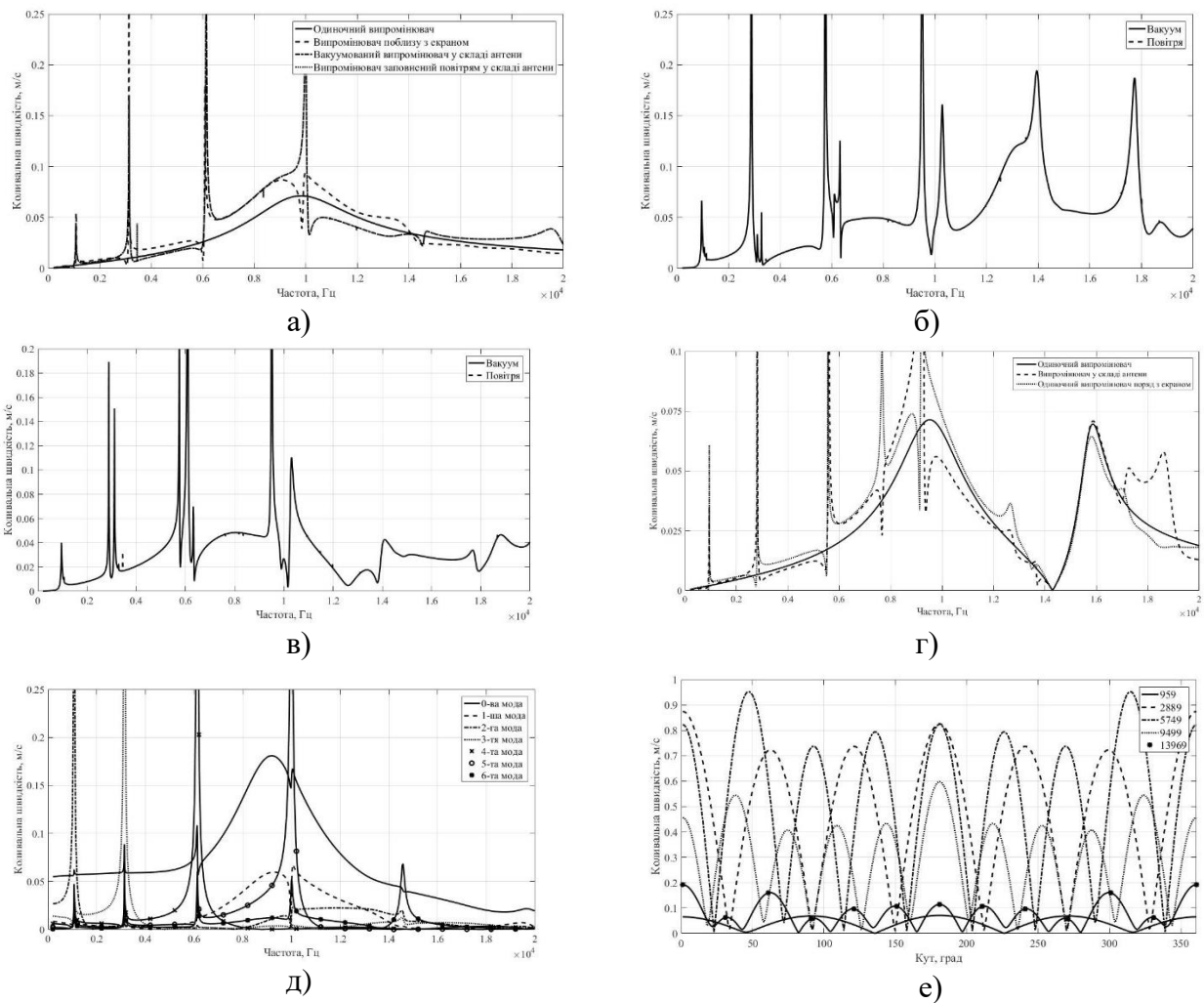


Рис.2 Частотні (а – г, е) і кутові залежності (д) коливної швидкості поверхонь випромінювачів у складі антенної решітки

Фізичними причинами виникнення описаних вище явищ є порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження перетворювачів у складі антени, викликане акустичною взаємодією елементів решітки.

При зміні типу побудови випромінювача з силового на компенсований (рис. 2, г) відбуваються кількісні зміни в частотних характеристиках зі збереженням раніше визначених характеристик.

В ході дослідження було визначено, що суттєві зміни коливної швидкості відбуваються не тільки в частотній області, а і при дослідженні кутового розподілу коливань по поверхні кожного із випромінювачів (рис. 2, д), що свідчить про втрату однорідного розподілу коливань випромінювача у складі антени.

Дослідження механічних полів випромінювачів у складі екранованих антен в залежності від наведених вище конструктивних характеристик дозволяють встановити нові закономірності формування механічних полів :

— появу в механічному полі випромінювачів додаткових вузькосмугових викидів як при розміщенні одиночного випромінювача поряд із екраном, так і при розміщенні випромінювачів у складі решітки з екраном;

- виникнення більшої кількості вузькосмугових викидів при зміні в силовій конструкції вакууму на повітря;
- суттєві зміни частотної характеристики коливальної швидкості поверхні випромінювачів при переході від силової до компенсованої конструкції випромінювачів;
- зміна частотної характеристики при переході від кругового до секторного випромінювання;
- залежність частотної характеристики від кількості випромінювачів та місця їх розміщення у складі решітки;
- залежність амплітуди коливань від розмірів акустичного екрану;
- виникнення нерівномірності коливань поверхні випромінювачів у складі решітки;
- ефективний перерозподіл енергії коливань нульової моди між наступними після нульової модами коливань;
- до зміни кількісних характеристик механічних полів при зміні складу та характеру поляризації активного елементу.

Третій розділ роботи присвячено дослідженню акустичних полів антенної решітки. В якості досліджуваних характеристик акустичного поля прийняті частотні залежності акустичного тиску на поверхні випромінювачів та кутові залежності в ближньому та дальньому полях антени. При дослідженні акустичного поля аналізували ті ж самі ситуації, що і при дослідженні механічних полів антени, для тих самих розмірів, параметрів п'єзокераміки, кількості випромінювачів та характеристик середовища, як зовнішнього та і внутрішнього.

З урахуванням виду потенціалів поля зовні перетворювачів вирази для тиску набувають вигляду:

$$P_1(r_s, \varphi_s) = -i\omega\rho_1 \left[A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} J_n(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{im\varphi_s} \right],$$

$$s = 1, \dots, N, \quad r_{2s} < r_s, \quad 0 < |\varphi_s| < \pi.$$

Вирази для оцінки діаграм направленості кругової антени з екраном мають вигляд:

$$P_{1D}(\varphi) = -i\omega\rho \left(\frac{2}{\pi kr} \right)^{1/2} e^{i\left(-\frac{\pi}{4} + kr\right)} \left[\sum_{s=1}^N e^{-ikR_0 \cos(\varphi - \varphi_0(s-1))} \sum_n A_n^{(s)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi} + \sum_n A_n^{(N+1)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi} \right].$$

Для систематизованого дослідження властивостей акустичних полів, що створюються екранованими круговими циліндричними решітками циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, залежність від конструктивних характеристик антен визначалися кількісні значення частотних та кутових залежностей амплітуд та фаз акустичного тиску для тих же конструктивних характеристик антен, що і для механічних полів.

Такий підхід забезпечує можливість встановлення кількісних закономірностей зв'язаності та взаємного впливу один на одного всіх фізичних полів, що приймають участь в роботі антен, які розглядаються.

Аналіз кривих на рис. 3 дозволяє визначити кількісний вплив на формування акустичних полів антени з екраном відповідно взаємодії між випромінювачем і екраном і взаємодії випромінювачів між собою і між ними і екраном.

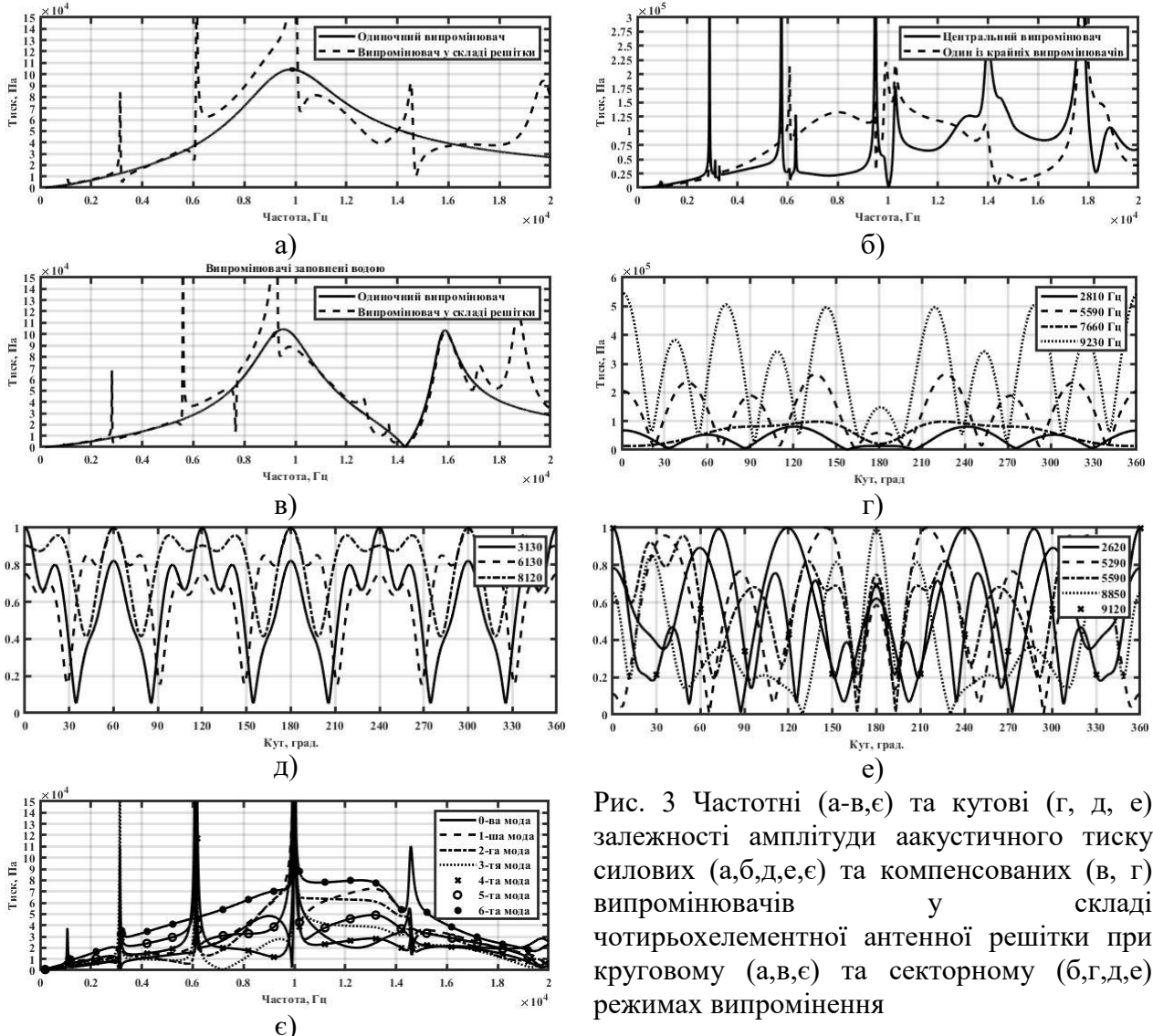


Рис. 3 Частотні (а-в,є) та кутові (г, д, е) залежності амплітуди акустичного тиску силових (а,б,д,е,є) та компенсованих (в, г) випромінювачів у складі чотирьохелементної антенної решітки при круговому (а,в,є) та секторному (б,г,д,е) режимах випромінювання

Так, при рівномірному розміщенні випромінювачів (рис. 3, а; 3, в) випромінювачі у складі антени з точки зору взаємодії по акустичному полю знаходяться в однакових умовах. Крім того, при малій кількості випромінювачів в такій антені основний вплив на формування її акустичного поля здійснює обмін акустичними хвилями між випромінювачами і екраном, оскільки взаємодія між випромінювачами, через їх велику рознесеність між собою майже відсутня. Описана взаємодія виражається в наступному: в низькочастотній області з'являється ряд нових додаткових резонансних частот, значення яких в (3 – 5) разів менші значень основної резонансної частоти оболонки. При цьому їх амплітуди дорівнюють або значно більші за амплітуди одиночного випромінювача без екрану. В резонансній області плавний хід частотної залежності амплітуд звукового тиску одиночного випромінювача

перетворюється в криву з декількома провалами, один з яких припадає на частоту резонансу одиночного випромінювача. При цьому його амплітуда в декілька разів перевищує амплітуду тиску одиночного випромінювача. В високочастотній області так само, як і в резонансній області, рівномірно спадаюча крива тиску одиночного випромінювача змінюється в багаторезонасну з великою кількістю викидів та провалів, амплітуди яких є як вищими, так і нижчими за амплітуду тиску на поверхні одиночного випромінювача в цій частотній області.

Перехід від кругового випромінення звуку до секторного (рис. 3, б) обумовлює появу в антені значної взаємодії по акустичному полю між випромінювачами, результатом чого є суттєва зміна частотних залежностей акустичного тиску на поверхнях випромінювачів.

Аналіз кривих (рис. 3, г) демонструє: частотні залежності тиску стають суттєво залежними від місця розташування випромінювачів в круговій антені; загальний рівень випромінення суттєво відрізняється в різних частотних діапазонах для крайніх і середніх випромінювачів кругової антени; в областях низьких і резонансних частот загальний рівень випромінення звуку у крайніх випромінювачів більший ніж у середніх; в високочастотній області крайні випромінювачі мають значення частот і амплітуд утворених в антені додаткових резонансів близькими до значень характерних при круговому випроміненні. В той самий час у середніх випромінювачів кількість додаткових резонансів збільшується, значення їх резонансних частот порівняно із крайніми випромінювачами зменшується, а амплітуди акустичного тиску на цих частотах суттєво збільшуються. В резонансній області поява додаткової сильної акустичної взаємодії між випромінювачами практично розвалює широкосмугову резонансну криву п'єзокерамічної оболонки без екрану на ряд резонансів зі значно меншими, в 10 – 15 разів, резонансними смугами, але суттєво більшими амплітудами. Це спостерігається як для середніх, так і для крайніх випромінювачів в решітці. В високочастотній області значення нових додаткових резонансних частот у крайніх та середніх випромінювачів майже співпадають, при цьому амплітуди таких резонансів для секторного випромінення значно перевищують аналогічні при круговому випроміненні.

Встановлене і кількісно визначене порушення завдяки акустичній взаємодії елементів кругової антени з екраном радіальної симетрії акустичного навантаження випромінювачів при збереженні її при електричному навантаженні обумовило появу наступних за нульовою мод коливань п'єзокерамічних оболонок в механічних полях випромінювачів кругової антени з екраном і ефективний перерозподіл енергії, яка «закачується» в випромінювачі на нульовій моді їх коливань, між цими модами.

Фізичними причинами цього є багатократне розсіяння звукових хвиль елементам кругової антени.

Розглянемо тепер, як діє цей механізм при формуванні акустичних полів антени в її дальньому полі. Аналіз графіків рис. 3, д; 3, е дозволяє встановити наступне. Як і очікувалося, при круговому випроміненні сигналів круговою циліндричною антеною з екраном (рис. 3, д) антена формує акустичне поле з

максимальними значеннями в областях кутів, які прилягають до напрямків розміщення випромінювачів в антенах і в середніх між ними.

Перехід від кругового випромінювання звуку до секторного принципово змінює ситуацію, пов'язану із направленістю кругової антени з екраном. Ці зміни полягають в набутті антеною властивості однонаправленості. Ця однонаправленість формується в області кутів, які прилягають до напрямку розміщення центрального випромінювача сектора. При цьому зі сторони екрану в цьому секторному кутовому розподілі формуються амплітуди тиску з низькими рівнями. Це характерно для більшості частот. Однак при цьому є і виключення. Вони пов'язані із деякими частотами додаткових резонансів.

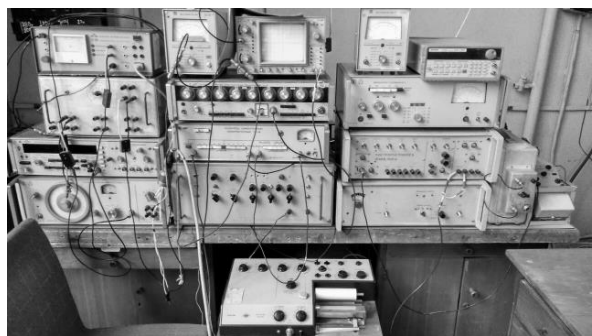
Зміна складу п'єзокераміки в конструкції випромінювача не змінює умов формування фізичних полів в кругових антенах з екраном.

Зміна кількості випромінювачів у складі решітки або відстані між елементами у складі решітки дуже суттєво впливає на взаємодію між елементами решітки, що відображається на частотних та кутових характеристиках акустичного поля.

З метою підтвердження відповідності прийнятих в роботі припущень реальним особливостям кругових антенних решіток з екраном, на базі вимірювального басейну ДП «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» (рис. 4) були проведені експериментальні дослідження акустичних полів двохелементної антенної решітки (рис. 4 а) з екраном. В якості акустичного екрану був використаний пінопласт розмірами: висота – $H = 265 \text{ мм}$; діаметр – $d_{1s} = 64.5 \text{ мм}$. Активні елементи випромінювачів силової конструкції мали окружну поляризацію, склад п'єзокераміки ЦТБС-3, висоту $H = 265 \text{ мм}$, діаметр $d_{1s} = 64.5 \text{ мм}$ і товщину оболонки $h_s = 5 \text{ мм}$. Випромінювачі розміщено на відстані 10 мм між поверхнями випромінювачів і поверхнею екрану. Електричне збудження здійснювалося напругою $U = 200 \text{ В}$ на частоті $f = 16 \text{ кГц}$. Блок-схема вимірювального стенду та його фотографія приведені на рис. 4, б; 4, в.



а)



б)

Рис. 4 Макет досліджуваної антени (а) та фото стенда (б)

Кількість незалежних реалізацій кутових залежностей амплітуд акустичного поля була обрана рівною 10. Згідно із ОСТ.5.8361-86 це забезпечує середньоквадратичну похибку вимірювань кутових залежностей 0,07 при довірчій вірогідності 0,95.

Співставлення усереднених експериментально визначених кутових залежностей амплітуд акустичного поля в дальній зоні антени з розрахованими (рис. 5) свідчить про те, що прийняті в роботі припущення відповідають реаліям досліджуваних типів антен.

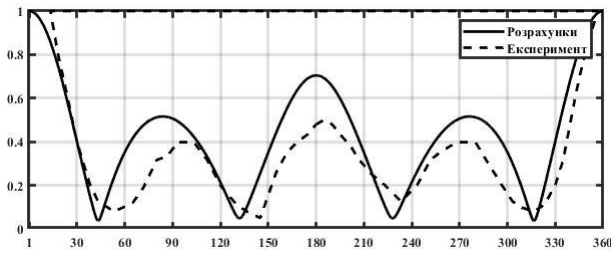


Рис.5 Розраховані та експериментальні кутові залежності акустичного поля

Четвертий розділ роботи присвячено дослідженню електричних полів кругових антен з екраном. В якості досліджуваних характеристик були прийняті: електричний струм випромінювачів повний та його складові; вхідний електричний опір – повний та його активна та реактивна складові.

Для визначення повного електричного струму на одиницю довжини випромінювачів використовувалися вирази:

$$\bullet I^{(S)} = -i\omega \int_0^{2\pi} \left[-\varepsilon_{33}^{(S)} \frac{\psi_{0S}}{h_S} + \frac{e_{31}}{r_{0S}} \left(\sum_n i n u_{nS} e^{in\varphi_S} + \sum_n i n w_{nS} e^{in\varphi_S} \right) \right] r_{0S} d\varphi_S, S=1, \dots, N,$$

для випромінювачів з радіальною поляризацією;

$$\bullet I^{(S)} = -i\omega S_{\text{ел}} \left[-\varepsilon_{33}^{(S)} \frac{\psi_{0S} M_S^2}{2\pi r_{0S}} + \frac{e_{33}^{(S)}}{r_{0S}} \sum_{j=1}^{M_S} \left[\sum_n i n u_{nS} e^{in \frac{2\pi j}{N_S}} + \sum_n w_{nS} e^{in \frac{2\pi j}{N_S}} \right] \right], S=1, \dots, N.$$

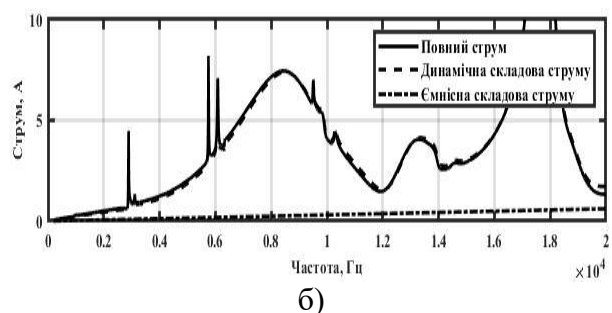
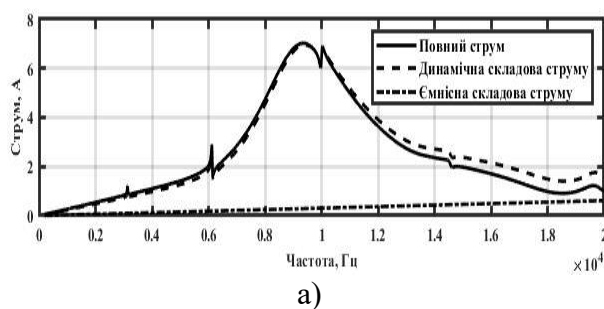
для випромінювачів з окружною поляризацією

В них перші доданки відповідають ємнісній складовій струму, а другі – динамічній.

Вхідний опір випромінювачів визначався згідно із законом Ома.

Розрахунки проводилися для тих самих характеристик кругових антен з екраном, які були прийняті при дослідженні механічних і акустичних полів. Деякі з цих розрахунків представлені на рис 6 – 7.

При аналізі електричних полів для варіантів побудови антени з визначеними в роботі конструкціями було встановлено, що при всіх режимах збудження випромінювачів повні електричні струми та їх вхідні електричні опори відрізняються як між собою, так і від одиночного випромінювача. При цьому ємнісна складова повного струму змінюється лінійно з частотою, а динамічна складова має складні залежності. Вони суттєво залежать від: місця розташування



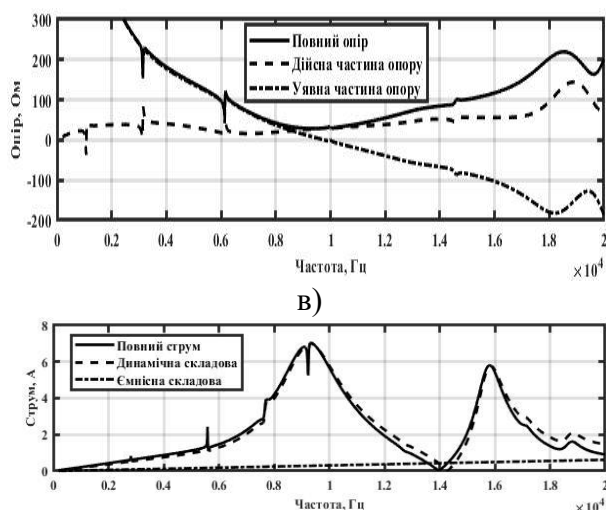


Рис. 6. Частотні залежності повного, динамічного та ємнісного струму (а,б) та повного опору, його дійсної і уявної частин (в) випромінювача силової конструкції у складі 4-х елементної антенної решітки з екраном, при круговому (а,в) та секторному випромінненні (б)

Рис. 7 Частотні залежності повного, динамічного та ємнісного струму випромінювача компенсованої конструкції у складі 4-х елементної антенної решітки з екраном при круговому випромінненні

випромінювачів в круговій антені з екраном; режиму випроміннення; типу конструктивного виконання випромінювачів та фізичних параметрів речовини, що заповнює внутрішні порожнини випромінювачів; розмірів антени, випромінювачів та екрану.

Наявність зв'язаності полів при перетворенні енергії та її форми в зовнішньому середовищі обумовлює появу ряду ефектів, які на перший погляд є парадоксальними. В частотних характеристиках електричних опорів виявлені частоти і навіть діапазони частот, на яких активний опір випромінювачів обнуляється або навіть набуває від'ємних значень. Це свідчить про те, що такі випромінювачі у складі антени, поглинаючи електричну енергію від збуджуючих електричних пристроїв, не випромінюють її в оточуюче середовище. Більше того, при від'ємних значеннях входних активних опорів випромінювачі переходять в режим поглинання акустичної енергії із оточуючого середовища і перетворення її в електричну. Кількість цих частот і їх значення визначено характеристиками випромінювачів і антени.

Виявлені ефекти обумовлені появою у складі механічного поля наступних за нульовою мод коливань з амплітудами, близькими до амплітуди нульової моди. Тому, коли на якій-небудь частоті енергія акустичного поля антени перевищує енергію, випроміненою її перетворювачем на нульовій моді, на якій збуджено цей випромінювач, надлишок енергії закачується в цей випромінювач зовнішнім акустичним полем і перетворюється ним, знову ж таки тільки на нульовій моді в електричну енергію. Такі випромінювачі на цих частотах потрапляють у складне становище по своїй механічній міцності, оскільки забирають енергію і від генератора, і від інших випромінювачів в антені.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи можливо сформулювати наступним чином:

1. Вперше запропоновані нові розрахункові моделі кругових циліндричних антенних решіток з екранами, які утворені із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, що дозволяють в рамках стаціонарної гідроелектропружності при проектуванні решіток врахувати вплив фізичних, механічних та електричних

характеристик решіток, а їх елементів на формування їх електричних, механічних та акустичних полів.

2. Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях розв'язані наскрізні задачі випромінення гідроакустичних сигналів круговими антенними решітками, що утворено із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів та екрану, з урахуванням зв'язаності електричних, механічних та акустичних полів при перетворенні енергії та багатократного обміну випроміненими та відбитими звуковими хвилями між всіма елементами антенних решіток при формуванні ними акустичних полів в оточуючих середовищах.

3. З використанням одержаних аналітичних співвідношень вперше з єдиних методичних підходів встановлені якісні та кількісні закономірності формування електричних, механічних та акустичних полів решіток та випромінювачів в залежності від характеристик їх конструкцій.

4. При дослідженні механічних полів решіток та випромінювачів вперше встановлені та досліджені їх суттєві зміни, пов'язані із втратою випромінювачами у складі решіток одномодовості механічних полів. Показано, що при радіально симетричному електричному навантаженні випромінювачів і асиметричному акустичному навантаженню їх у складі решіток поява багатомодовості механічних полів випромінювачів обумовлена генерацією в них крім нульової наступних за нею форм механічних коливань і ефективному перерозподілу між всіма модами коливань енергії, що «закачується» в випромінювачі антенної решітки тільки на нульовій моді.

5. При дослідженні акустичних полів антенних решіток вперше встановлено збагачення їх спектру резонансних частот і значне розширення його в області низьких частот. Кількість заново генерованих резонансних частот випромінення сигналів визначають конструктивні та фізичні характеристики решіток і випромінювачів. Їх найнижча частота може приймати значення, в 3 – 5 разів нижче порівняно із резонансною частотою одиночного випромінювача при близьких величинах акустичного тиску. Встановлено, що фізичними причинами появи наведених особливостей акустичних полів решіток є надбання механічними полями її випромінювачів у складі решіток властивості багатомодовості.

6. При дослідженні електричних полів вперше встановлені закономірності поведінки параметрів електричних полів в залежності від параметрів решіток та їх елементів. Встановлено частотні діапазони, в яких управління повним струмом збудження випромінювачів здійснюється його ємнісною або динамічною складовими. Визначені умови змін характерів поведінки активного та реактивного складових електричного опору випромінювачів.

Встановлено кількісний зв'язок між змінами амплітуд нульової моди коливань механічного поля в різних частотних діапазонах і відповідними їм змінам динамічної складової струму електричного поля. Виявлені умови набуття вхідним активним електричним опором випромінювачів від'ємних значень та їх зв'язок з акустичним полем цих випромінювачів.

7. Адекватність запропонованих моделей реальним круговим антенним решіткам з екраном підтверджена експериментом.

8. Отримані результати мають практичне значення, пов'язане із наступним:

- виявлені умови практичного збільшення енергетичної ефективності кругових антенних решіток з екраном без змін їх розмірів і характеру електричного збудження шляхом використання резонансного випромінювання сигналів в збагаченому низькочастотному спектрі власних частот решітки;
- створенням можливостей раціонального вибору побудови конструкцій кругових антен з екраном, при їх проектуванні шляхом розрахунку параметрів варіантів антен при різних значеннях геометричних, фізичних, механічних та електричних характеристик утворюючих антени елементів;
- забезпеченням можливостей раціонального проектування електронних генераторів, які збуджують випромінювачі кругових антен з екраном, завдяки створенню раніше відсутніх методик розрахунку електричних полів п'єзокерамічних випромінювачів у складі таких антен.

Результати дисертаційної роботи впровадженні в державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів», що підтверджується актом впровадження.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ:

1. Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом. *Электроника и связь*. 2013. № 5. С. 50–55. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів випромінювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.
2. Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектом. *Электроника и связь*. 2013. № 6. С. 62–73. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.
3. Лейко А. Г., Нижник А. И., Старовойт Я. И. К вопросу об излучении звука цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями различной конструкции. *Электроника и связь*. 2014. № 1. С. 81–94. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus)*.
4. Лейко А.Г., Нижник А.И., Гладких Н.Д., Старовойт Я.И. Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной поляризацией. *Электроника и связь*. 2014. № 3. С. 62–72. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів електричних полів антени та їх аналізі (Index Copernicus)*.
5. Лейко А.Г., Старовойт Я.И. Физические поля круговых цилиндрических гидроакустических антенн с экраном и цилиндрическими пьезокерамическими излучателями. *Электроника и связь*. 2015 № 3. С. 94–100. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.

6. Лейко А.Г., Старовойт Я.И. Механічні поля циліндричного п'єзокерамічного випромінювача силової конструкції в присутності акустичного екрана. *Електроніка и связь*. 2017. № 6. С. 48–55. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.
7. Leiko, O., Derepa, A., Pozdniakova, O. and Starovoit, Y. Acoustic fields of circular cylindrical hydroacoustic systems with a screen formed from cylindrical piezoceramic radiators. *Romanian Journal of Aoustics and Vibration*. 2018. № 15. Р. 41–46. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів (Scopus)*
8. Циліндричний гідроакустичний перетворювач: пат. 99064 Україна: МПК G01S 7/52(2006.01). № 201500253; заявл. 14.01.15; опубл. 12.05.15, Бюл. № 9. 6 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу*.
9. Направлений циліндричний гідроакустичний перетворювач: пат. 99634 Україна: МПК G01S 7/52(2006.01). № 201500697; заявл. 28.01.15; опубл. 10.06.15, Бюл. № 11. 6 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу*.
10. Активно-пасивна система «Гідроакустична станція – надводний корабель»: пат. 100428 Україна: МПК G01S 7/52(2006.01). № 201500944; заявл. 06.02.15; опубл. 27.07.15, Бюл. № 14. 7 с. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу*
11. Лейко А., Петрищев О., Старовойт Я., Богданова Н. Соотношения электроупругости для расчета параметров эллиптических цилиндрических пьезокерамических преобразователей. *Болгарско списание за инженерно проектирование*. 2017. №1. С. 50–63. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus)*.
12. Лейко А. Г., Старовойт Я.И. Частотные свойства электрических полей цилиндрических пьезокерамических излучателей с экраном во внутренней полости. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2016. т. 8, № 4. С. 04018-1–04018-6. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Scopus)*
13. Старовойт Я.І. К вопросу об излучении звука цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем. VI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «ЕЛЕКТРОНІКА-2013»: збірник стататей, м.Київ, 29 – 30 квітня 2013 року. Київ, 2013. С.85–89.
14. Старовойт Я.І. Физические поля круговых цилиндрических гидроакустических антенн с экраном и цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с радиальной поляризацией. Акустичний симпозіум «Консонанс-2015»: збірник праць, м. Київ, 29 – 30 вересня 2015 року. Київ, 2015. С. 194–199.

15. Нижник О. І., Гладкіх Н. Д., Маслов Д. С., Гусак З. Т., Старовойт Я. І., Святненко А. О. Станція пошуку плавців-диверсантів. Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки: тези доповідей на VI науково-технічній конференції, м. Київ 15–18 грудня 2015 року. Київ, 2015. С. 406–407. *Внесок здобувача полягає в проведенні математичного моделювання.*
16. Старовойт Я.І. Механические поля цилиндрического пьезокерамического излучателя компенсированной конструкции в присутствии цилиндрического акустического экрана. IX міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «ЕЛЕКТРОНІКА-2016»: збірник статей, м. Київ, 13–15 квітня 2016 року. Київ, 2016. С. 95–99
17. Старовойт Я.І. О возможных путях повышения эффективности цилиндрических антенн с экраном, Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки. IV Міжнародна науково-практична конференція: тези доповідей, м. Київ, 12–13 жовтня 2016 року. Київ, 2016. С. 345–347

АНОТАЦІЯ

Старовойт Я.І. Теоретичні основи проектування кругових антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів і екрану - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена розробці теоретичних засад проектування та розрахунку кругових циліндричних гідроакустичних антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів в постановці задач стаціонарної гідроелектропружності та математичної фізики відносно випромінювання ними гідроакустичних сигналів з урахуванням взаємодії електричних, механічних та акустичних полів та практичній реалізації цих засад.

Автором проведено аналіз конструктивних особливостей побудови кругових антен, що складаються з циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів. Відповідно до розглянутих конструкцій розроблена розрахункова модель кругової антенної решітки та вибрано методи розв'язку задач визначення фізичних полів, які приймають участь в процесі роботи антени.

Ключові слова: гідроакустична антена, кругова антенна решітка, акустичний екран, фізичні поля, випромінювання гідроакустичних сигналів, циліндричний п'єзокерамічний випромінювач, конструктивні особливості.

АННОТАЦИЯ

Старовойт Я.И. Теоретические основы проектирования круговых антенных решеток, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей и экрана – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.08 - прикладная акустика и звукотехника. - Национальный

технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2020.

Диссертация посвящена разработке теоретических основ проектирования и проведения расчетов круговых цилиндрических гидроакустических решеток, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей в постановке задач стационарной гидроэлектроупругости и математической физики относительно излучения ими гидроакустических сигналов с учетом взаимодействия электрических, механических и акустических полей и практической реализации этих основ.

Автором проведен анализ конструктивных особенностей построения круговых антенн, которые состоят из цилиндрических пьезокерамических излучателей. В соответствии с рассмотренными конструкциями разработана расчетная модель круговой антенной решетки и выбраны методы решения задач определения физических полей, которые принимают участие в процессе работы антенны.

Ключевые слова: гидроакустическая антенна, круговая антенная решетка, акустический экран, физические поля, излучение гидроакустических сигналов, цилиндрический пьезокерамический излучатель, конструктивные особенности

SUMMARY

Starovoi Y.I. Theoretical basis for the design of the circular sonar arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators and the acoustic baffle. On the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.09.08 - Applied acoustics and sound engineering. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the development of theoretical principles for the design and calculation of circular cylindrical hydroacoustic sonar arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators in the formulation of stationary hydroelectroplastic and mathematical physics problems with respect to the radiation of their hydroacoustic signals, taking into account the interaction of electric, mechanical and acoustic fields, and the practical realization of these principles. The developed methods allow systematically to take into account the influence of the structural characteristics of the lattices and transducers in their composition on their physical fields, which interact with each other at the emission of signals.

The author analyzes the design features of the construction of circular antennas consisting of cylindrical piezoceramic emitters. These include, in the part of radiators, the composition of the piezoceramic material from which the active elements of the radiators were made, the type of polarization used and the nature of its organization, the type of constructive implementation of the emitter and the type of filling of the internal environment of the emitter, and in the part of the antenna array, the size of the acoustic screen, the distance between the elements in the grid, the number of elements in the grid and the lattice mode (circular or sector).

Particular attention is paid to the consideration of the interaction of these fields in the process of transforming the antenna into a grid of electric energy in a mechanical

and mechanical to acoustic, interaction of emitters in a grid between themselves and between emitters and the screen by the acoustic field, the reaction of the external and internal environments of the radiators to the excitation of acoustic fields in them, and the dependence of all of these factors on the specific geometric, physical and wave properties of lattice and radiator structures in their composition, namely: in the part of antenna re niches - the number of radiators in the lattice and the distance between them; lattice modes; acoustic screen dimensions; in the part of cylindrical piezoceramic emitters - the type of design, the type of internal filling, the type of piezoceramic material and the type of its polarization.

The author carried out experimental studies. The comparison of the results obtained experimentally with the calculated ones allows us to conclude that the design support for the design of circular antenna arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators developed in the work corresponds to the realities of the studied antennas.

A number of new physical properties of circular antenna arrays due to the interaction of both physical fields of different nature and the interaction of emitters in the lattice behind the acoustic field are established and investigated.

The expansion of the spectrum of the resonance frequencies of the acoustic fields of the antenna arrays has been revealed due to the emergence in the mechanical fields of cylindrical piezoceramic emitters of vibration modes following zero, which, in turn, arise due to violation of the radial symmetry of the radiation load of the emitter.

The regularities of formation of electric fields of radiators in the structure of antenna arrays are established. These include the dependence of the control of electric currents of antenna array radiators in their external circuits on the region of operating frequencies and the change and conditions of changes in the behavior of the behavior of the active and reactive components of the electrical resistance of the emitters in the lattice in the frequency regions.

The conditions under which it is possible to obtain effective radiation of hydroacoustic signals at frequencies much lower than their own resonant frequencies of shells of cylindrical emitters is determined.

The results obtained by the author allow to carry out calculations of quantitative values of parameters of mechanical, acoustic and electric fields of circular antenna arrays formed from cylindrical radiators and soft acoustic screen depending on the parameters and characteristics of concrete elements of their designs.

The results of the dissertation work were introduced at the State Enterprise "Kyiv Scientific Research Institute of Hydraulic Devices" when performing sound field calculations of cylindrical emitters under the contract and calculations of sound fields of antenna arrays of court stations and in the educational process of NTUU "KPI im. Igor Sikorsky".

Key words: hydroacoustic antenna, circular antenna array, acoustic screen, physical fields, radiation of hydroacoustic signals, cylindrical piezoceramic emitter, structural features.